

文章编号:1000-8055(2013)06-1409-06

热色液晶标定和使用的影响因素

赵 熙, 徐国强, 罗 翔, 冯 野, 王 蕾

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院
航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 在全面地分析热色液晶测量方法的基础上, 实验研究了热色液晶标定和使用的主要影响因素。保持频闪和相机的相对位置以及两者距拍摄窗口的距离一致, 在同一色调值下, 拍摄方式(无/有拍摄窗口)、有机玻璃拍摄窗厚度、热力方向(加热/冷却)和热色液晶老化分别产生最大约 0.5℃, 0.2℃, 0.26℃ 和 1.2℃ 的温度差异。转静间隙不影响热色液晶的显色特性。温度与色调的关系主要与频闪仪的发光介质有关。

关 键 词: 热色液晶 (TLC); 标定; 液晶老化; 滞后效应; 光学路径

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Effects on calibration and use of thermochromic liquid crystal

ZHAO Xi, XU Guo-qiang, LUO Xiang, FENG Ye, WANG Lei

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics,
School of Energy and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on comprehensive analysis of thermochromic liquid crystal measurement methods, insight into the main influential factors to any general calibration was provided. The relative position of the strobe and camera and the distance of these two devices to the shooting window were kept, and the temperature difference from the shooting modes with and without shooting window, the thickness of plexiglass shooting window, the differences between cooling or heating cycles (hysteresis) and the number of heating or cooling cycles (aging) are up to 0.5℃, 0.2℃, 0.26℃ and 1.2℃, respectively; the sealing gap of rotor-stator disc does not affect the performance of the thermochromic liquid crystal; the relationship of temperature and hue depends on the light-emitting medium.

Key words: thermochromic liquid crystal (TLC); calibration; crystal aging; hysteresis effect; optical path

在航空发动机涡轮盘腔的流动和换热研究中, 准确测量旋转盘表面的局部温度是实验研究的主要难点之一。传统的测量旋转部件表面温度的方法有热电偶和红外测温仪, 但由于旋转使得这两种方法的测试装置复杂且测温精度不高。Newton 等^[1]使用热色液晶 (TLC) 配合频闪照明拍摄系统能够克服这些缺点并准确地测量旋转盘

表面局部温度。本实验将采用该方法拍摄主盘面的热色液晶显色图片, 然后根据热色液晶显色时其色调值与温度值之间的标定关系确定盘面的瞬时温度。

热色液晶标定和使用时的影响因素较多, 国外已有不少学者做过相关研究。这些影响因素包括转盘旋转带来的离心力^[2-3], 不同照明光源^[4-5],

收稿日期: 2012-06-19

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130617.0940.201306.1409_026.html

作者简介: 赵熙(1982-), 男, 贵州毕节人, 博士生, 主要从事旋转换热的研究。

照明及拍摄的角度^[6-9],加热及冷却的滞后效应、热色液晶老化、热色液晶膜厚度^[10-11],光学路径、频闪频率^[12]等.在国内,热色液晶技术多用于测量物体的温度,对影响热色液晶标定和使用的因素缺乏全面而深入的研究.

本文标定实验中,频闪和相机的相对位置以及两者距拍摄窗口的距离均保持一致,因此标定实验主要研究光学路径、频闪频率 f 、加热老化、滞后效应等对热色液晶显色规律的影响;其中对于光学路径研究了直接(无拍摄窗口)与间接(有拍摄窗口)拍摄、有机玻璃拍摄窗口厚度 l 、转静间隙 L 的影响.

1 热色液晶及颜色模型

液晶是对介于液态和固态之间状态的一种中间相的一些有机化合物的称呼.液晶材料根据其分子结构可分为多种,最常见的为3种:近晶型液晶、向列型液晶和胆甾型液晶^[13].不同类型液晶在不同的电磁场、应力场、压力场或温度场影响下,其分子排列不一样.多数胆甾型液晶的颜色随着温度的变化而变化,且这种变化是可逆的,故胆甾型液晶又被称为热色液晶.

热色液晶颜色发生变化时,在低温段显示红色,进而出现绿色,最后在高温段出现波长最短的蓝色.其原理是由于温度变化使热色液晶的分子结构的螺距 P 发生改变,进而使热色液晶对反射光波长 δ 的选择相应改变.最大反射光波长可由下式^[14]确定:

$$\delta_{\max} = nP \cos \frac{1}{2} \left[\arcsin \left(\frac{\sin \theta_1}{n} \right) + \arcsin \left(\frac{\sin \theta_2}{n} \right) \right] \quad (1)$$

式中 θ_1 为入射角, θ_2 为反射角; n 为热色液晶折射率.可见热色液晶显示的颜色和热色液晶分子旋向的螺距、入射光的入射角度和光谱范围以及相对观察的位置等有关.当固定 θ_1 和 θ_2 时,颜色将只随 P 进而只随温度的变化而变化.热色液晶测温的关键就在于把热色液晶显示的颜色用一定的量化信息表达出来,即在使用热色液晶测温之前,应先对热色液晶进行温度标定.通常的方法是记录一定温度下对应的热色液晶显色图像,再读出图像上的颜色信息值,调节一系列温度,得到颜色信息值与温度的对应关系.

大多数彩色图形显示器使用的都是红、绿、蓝三原色混色模型,即 RGB 模型(图 1(a)),但该模型并不适应人的视觉特点,且每种颜色均要由 3

个量决定,使用起来不太方便.随着颜色科学的发展,色彩理论也有多种,本文采用 HSV 颜色模型^[15](图 1(b))来对热色液晶图片进行处理. HSV 模型中, H(hue), S(saturation), V(value) 分别代表颜色的色调(或称色相)、饱和度、亮度,作为变量时用 H, S, V 表示.所谓色调,就是通常所说的红($H=0^\circ$)、绿($H=120^\circ$)、蓝($H=240^\circ$)等视觉色彩,是一种颜色区别于另一种颜色的要素.饱和度是指颜色的纯度,在某种颜色中添加白色($S=0$)相当于减少该颜色的饱和度.亮度则为颜色的明亮程度,在某种颜色中添加黑色($V=0$)相当于减少该颜色的亮度.在 HSV 颜色模型的 3 个要素中,根据色调即可区别不同的颜色,因此在标定热色液晶时,可只对色调这一颜色信息值进行温度标定,即得到 $t \sim H$ 的关系.这样还避开了饱和度和亮度,从而避免由于照明强度不同带来的影响.本文在计算机中用 VB 程序处理热色液晶显色图片时,采用的 RGB 颜色模型与 HSV 颜色模型转化关系为^[14]

$$\begin{cases} V = \max(R, G, B) \\ S = \begin{cases} [V - \min(R, G, B)]/V & V > 0 \\ 0 & V = 0 \end{cases} \\ H = \begin{cases} 60(G - B)/(SV) & V = R \\ 60[2 + (B - R)/(SV)] & V = G \\ 60[4 + (B - R)/(SV)] & V = B \\ 0 & V = 0 \\ H + 360 & H = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

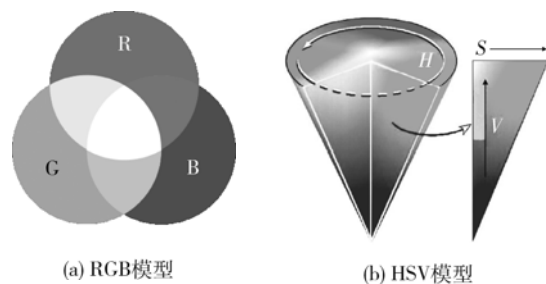


图1 颜色模型

Fig. 1 Color models

2 标定设备和方法

Syson 等^[2]的研究表明,转盘的离心加速度即便达到 $16\,000\,g$ (本文最大为 $3\,525\,g$, g 为重力加速度)时,热色液晶的显色特性几乎不受旋转的影响,因此本文只标定静止状态下的热色液晶显

色规律. 标定分别对 30 °C, 35 °C 和 40 °C 窄幅热色液晶进行, 热色液晶带宽均为 1 °C. 图 2 所示为热色液晶标定设备示意图, 标定设备主要由标定件以及照明、加热、拍摄、测温等装置构成.

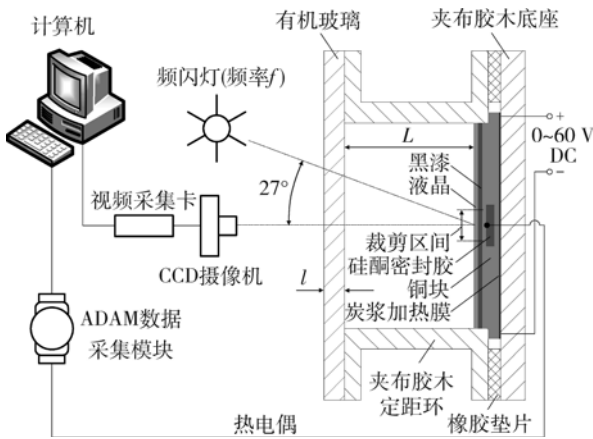


图 2 热色液晶标定设备示意图

Fig. 2 Schematic diagram of calibration equipment of thermochromic liquid crystal

标定件中铜块的直径为 100 mm, 厚度为 6 mm. 标定前使用喷涂工具在铜块表面喷涂黑漆(用来增加热色液晶显色时的对比度)和热色液晶. Kakade 等^[12]的研究表明厚度越大, 热色液晶对其他因素的影响越不敏感. 本文在喷涂黑漆及热色液晶时, 通过控制两者的用量, 使得喷涂的黑漆层厚度为 8~12 μm, 热色液晶膜厚度为 45~50 μm, 根据 Kakade 等的结论, 此时由涂层厚度带来的测温误差不超过 0.1 °C. 铜块背面中心处加工

有直径为 20 mm、深为 4 mm 的圆槽, 圆槽中心紧贴铜块安装有两对铜-康铜热电偶, 在槽内覆盖云母片后, 再填充硅酮密封胶以固定热电偶导线. 两对热电偶经水浴法标定后最大重复性误差不超过 ±0.06 °C. 铜块由其背面使用导热硅胶粘接的炭浆加热膜加热, 加热膜电阻约为 200 Ω. 有机玻璃用以模拟换热实验件中的观察窗, 且其与铜块之间的距离 L 由夹布胶木定距环控制, 以模拟实验件的转静间隙.

标定实验使用的照明光源为 SHIMPO DT-315N 型频闪仪. 频闪仪工作时以一定的频率 f 闪光. 炭浆加热膜由输出为 0~60 V 的连续可调直流电源供电, 标定选择的加热功率约 8 W, 这使得加热时铜块温度以不超过 0.02 °C/s 的速率上升. 在对铜块进行加热和冷却的过程中, 一方面热电偶输出的温度信号由亚当(ADAM)数据采集模块进行采集并传输至计算机, 并用 VB 程序转换并记录温度-时间值; 另一方面使用 SONY W220 型电荷耦合原件(CCD)摄像机的摄像功能以 25 帧/s 的帧率记录铜块表面热色液晶颜色变化视频, 再由 EASYCAP 图像采集卡传输至计算机, 为保证图片帧率和节省计算机磁盘空间, 对采集卡设置的图像分辨率为 352 像素×288 像素.

标定得到铜块表面热色液晶颜色变化的视频后, 数据处理时首先使用 WinMPG Video Convert 软件将视频转化为时间序列图片(如图 3 所示), 相邻编号图片的时间间隔为 (1/25) s, 根据图片中的时间信息即可确认各图的时间点 τ . 然后使

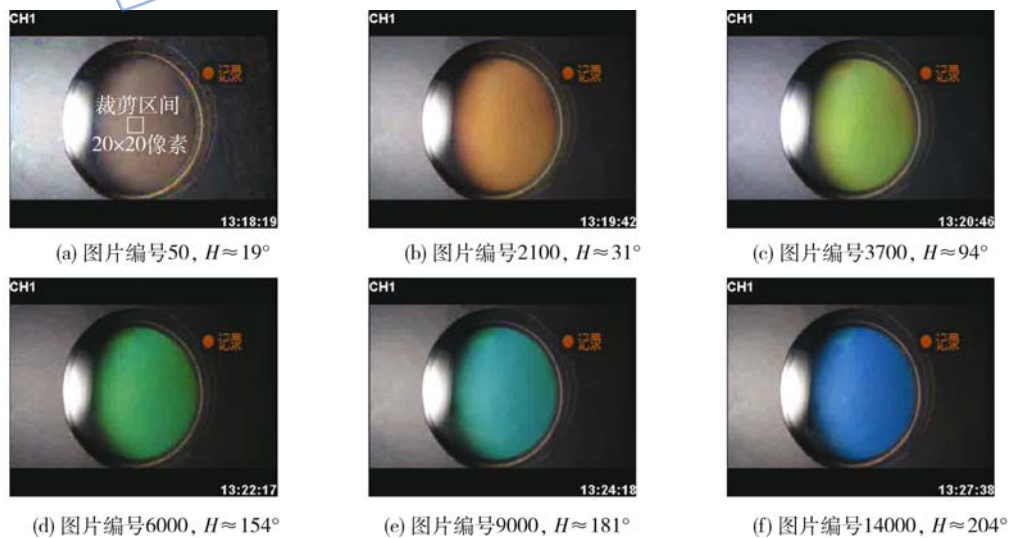


图 3 典型热色液晶标定的颜色变化

Fig. 3 Typical color variation of thermochromic liquid crystal calibration

用 Irfanview 软件将每张图片在铜块表面中心正对热电偶处裁剪为 20 像素 \times 20 像素的区域, 由 VB 程序计算该区域的平均 H 值后, 得到 $H \sim \tau$ 的变化曲线. 最后通过插值及代数平均方法将 $H \sim \tau$ 曲线的时间刻度与热电偶测得的 $t \sim \tau$ 关系的时间轴对应, 即可得到 $t \sim H$ 的关系.

3 影响因素的标定结果

3.1 拍摄方式(直接、间接)

图 4 所示为 35 °C 热色液晶标定时直接拍摄与间接拍摄所得的 $t \sim H$ 结果的比较. 图中转静间隙 $L=61.5$ mm, 频闪频率 $f=1500$ 帧/min, 标定值均由加热过程数据计算得到, 且热色液晶经受的均是第一次加热-冷却循环(图中用 C_1 表示, 若经受的是第 n 次加热-冷却循环则用 C_n 表示, 下同). 由图 4 可见, 直接拍摄与间接拍摄时热色液晶 H 值随 t 单调变化, 但不呈线性规律; 两种标定分布具有相似的形状, 但可明显看到对于同一 H 值有最大约 0.5 °C 的温差.

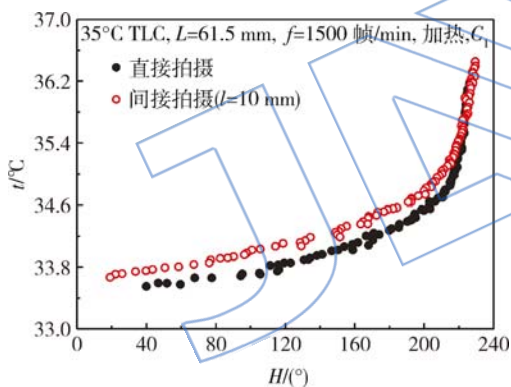


图 4 拍摄方式(直接和间接)对热色液晶标定的影响
Fig. 4 Effects of shooting mode (direct and indirect) on thermochromic liquid crystal calibration

3.2 有机玻璃拍摄窗厚度 l

图 5 给出了间接拍摄时有机玻璃拍摄窗的厚度 l 对标定结果的影响情况. 由图 5 可见其他条件不变时, l 的变化使得同一 H 值下温度值产生最大约 0.2 °C 的差异. 产生上述现象的原因是安装不同厚度有机玻璃后, 由于折射程度的不同, 热色液晶反射出 RGB 光谱成分有所改变, 继而改变了色调值. 对其他两种活性温度的热色液晶标定后也得到相似的结果.

3.3 转静间隙 L

图 6 表示的是 30 °C 热色液晶在不同转静间

隙下的标定结果. 可以看到不同 L 下的标定在热色液晶的测温误差范围内, 说明由转静间隙改变引起的光学过程变化不足以影响热色液晶的显色特性.

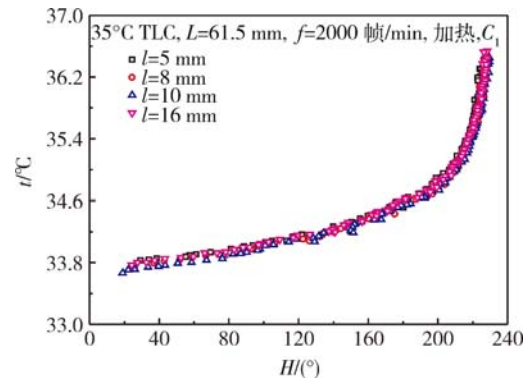


图 5 有机玻璃拍摄窗厚度对热色液晶标定的影响
Fig. 5 Effects of thickness of plexiglass shooting window on thermochromic liquid crystal calibration

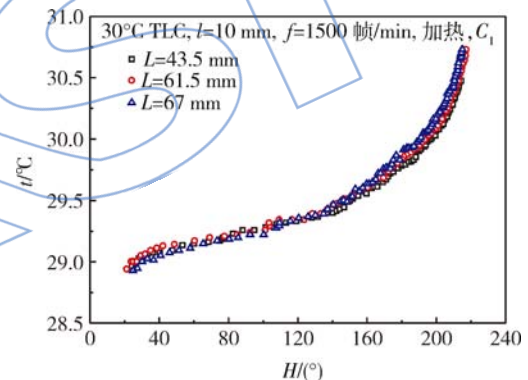


图 6 转静间隙对热色液晶标定的影响
Fig. 6 Effects of sealing gap of rotor-stator disc on thermochromic liquid crystal calibration

3.4 频闪频率 f

图 7 为 35 °C 热色液晶在不同频闪频率下的标定结果. 由图可见, $t \sim H$ 的关系受频闪频率的影响很小. 本文使用的频闪仪的发光介质为氙, 频闪频率改变时, 氙灯的光谱分布及相对强度并不改变, 因此热色液晶反射出的光谱成分也不会变化, 故 $t \sim H$ 的关系应不受频率影响, 而图中出现的标定值的微小差异可能是由于热色液晶喷涂厚度不均所致.

3.5 加热老化

图 8 为 35 °C 热色液晶经历多次加热-冷却循环时的标定结果. 每次循环中热色液晶由室温被加热至 45 °C, 然后切断加热电源进行冷却; 从显

色温度 35 °C 附近加热至 45 °C 的过程约持续 500 s,从 45 °C 冷却至 35 °C 附近持续约 700 s,则热色液晶处在高于显色温度的高温环境的总时间约 1200 s. 由图可见,各次循环的标定分布形状相似,但与第 1 次循环 C_1 相比,相同 H 值下 C_3 所得的温度值最大降低约 0.1 °C, C_6 最大降低约 0.27 °C,而 C_{10} 则最大降低约 1.2 °C. 这是由于重复使用和长时间的高温暴露使热色液晶结构受到不可逆破坏,热色液晶发生老化,进而影响其热色特性. Wiberg 等^[11]的研究表明,热色液晶膜厚度越大,则老化过程越慢.

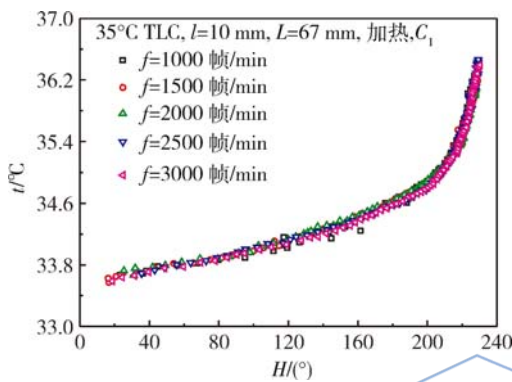


图 7 频闪频率对热色液晶标定的影响
Fig. 7 Effects of strobe frequency on thermochromic liquid crystal calibration

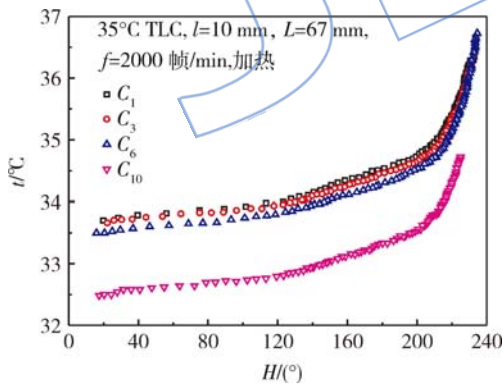


图 8 加热老化对热色液晶标定的影响
Fig. 8 Effects of variation with the number of heating or cooling cycles (aging) on thermochromic liquid crystal calibration

3.6 滞后效应

图 9 所示为换热实验中使用的 40 °C 热色液晶在加热和冷却时的标定结果. 加热-冷却过程中最高温度为 43 °C. 虽然热色液晶标定时加热功率(仅为 8 W)以及图片裁剪区域与热电偶测点间的

距离(仅为 2 mm)均比较小,且铜块的导热系数很大(约为 400 W/(m·K)),由铜块导热热阻引起的温差可忽略. 但是由图 9 可见,加热和冷却热力方向的不同却使热色液晶在相同 H 值下显色温度出现偏差,最大约 0.26 °C,这便是热色液晶的滞后效应. Kakade 等^[12]的研究表明,滞后效应可通过保证标定过程与应用过程中的热力方向相同而减弱.

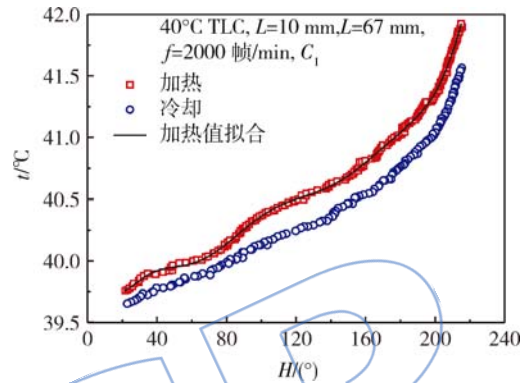


图 9 滞后效应对热色液晶标定的影响
Fig. 9 Effects of differences between cooling or heating cycles (hysteresis) on thermochromic liquid crystal calibration

4 结 论

由上述热色液晶标定和使用的影响因素分析,得出结论:

- 1) 直接拍摄与间接拍摄时热色液晶色调值均随温度单调变化,对于同一 H 值有最大约 0.5 °C 的温差.
- 2) 有机玻璃拍摄窗厚度 l 的变化使得同一 H 值下温度值产生最大约 0.2 °C 的差异.
- 3) 转静间隙改变不影响热色液晶的显色特性.
- 4) $t \sim H$ 的关系受频闪频率的影响很小,与频闪仪的发光介质有关.
- 5) 长时间的高温暴露会使热色液晶发生老化,使用时需要限定热色液晶的重复使用次数.
- 6) 加热和冷却热力方向的不同使热色液晶在相同 H 值下,显色温度出现最大约 0.26 °C 的温差.

参考文献:

[1] Newton P J, Yan Y, Stevens N E, et al. Transient heat transfer measurements using thermochromic liquid crystal; Part 1 an improved technique[J]. International Journal

- of Heat Fluid Flow, 2003, 24(1): 14-22.
- [2] Syson B J, Pilbrow R G, Owen J M. Effect of rotation on temperature response of thermochromic liquid crystal[J]. International Journal of Heat Fluid Flow, 1996, 17(5): 491-499.
- [3] Camci C, Glezer B, Owen J M, et al. Application of thermochromic liquid crystal to rotating surfaces[J]. Transactions Journal of Turbomachinery, 1998, 120(1): 100-103.
- [4] Behle M, Schultz K, Leiner W, et al. Color-based image processing to measure local temperature distributions by wide-band liquid crystal thermography[J]. Applied Scientific Research, 1996, 56(2): 113-143.
- [5] Anderson M R, Baughn J W. Liquid crystal thermography: illumination spectral effects[J]. Journal of Heat Transfer, 2005, 127(6): 581-587.
- [6] Camci C, Kim K, Hippensteele S A. A new hue-capturing technique for the quantitative interpretation of liquid crystal images used in convective heat transfer studies[J]. Transactions Journal of Turbomachinery, 1992, 114(4): 765-775.
- [7] Farina D J, Hacker J M, Moffat R J, et al. Illuminant invariant calibration of thermochromic liquid crystals[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1994, 9(1): 1-12.
- [8] Sabatino D R, Praisner T J, Smith C R. A high-accuracy calibration technique for thermochromic liquid crystal temperature measurements[J]. Experiments in Fluids, 2000, 28(6): 497-505.
- [9] Chan T L, Ashforth-Frost S, Jambunatahan K. Calibrating for viewing angle effect during heat transfer experiments on a curved surface[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(12): 2209-2223.
- [10] Anderson M R, Baughn J W. Hysteresis in liquid crystal thermography[J]. Journal of Heat Transfer, 2004, 126(3): 339-346.
- [11] Wiberg R, Lior N. Errors in thermochromic liquid crystal thermometry[J]. Review of Scientific Instruments, 2004, 75(9): 2985-2994.
- [12] Kakade V U, Lock G D, Wilson M, et al. Accurate heat transfer measurements using thermochromic liquid crystal, Part 1 calibration and characteristics of crystals[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2009, 30(5): 939-949.
- [13] 罗翔. 复杂旋转盘腔内冷气的流动与换热特性研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2003.
LUO Xiang. Flow and heat transfer of cooling air in a complex rotating cavity[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003. (in Chinese)
- [14] 王良御, 廖松生. 液晶化学[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [15] 李莉. 新型涡轮叶片内部冷却结构的流动与换热研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2009.
LI Li. Flow and heat transfer in the internal cooling structure of a novel turbine blade[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009. (in Chinese)